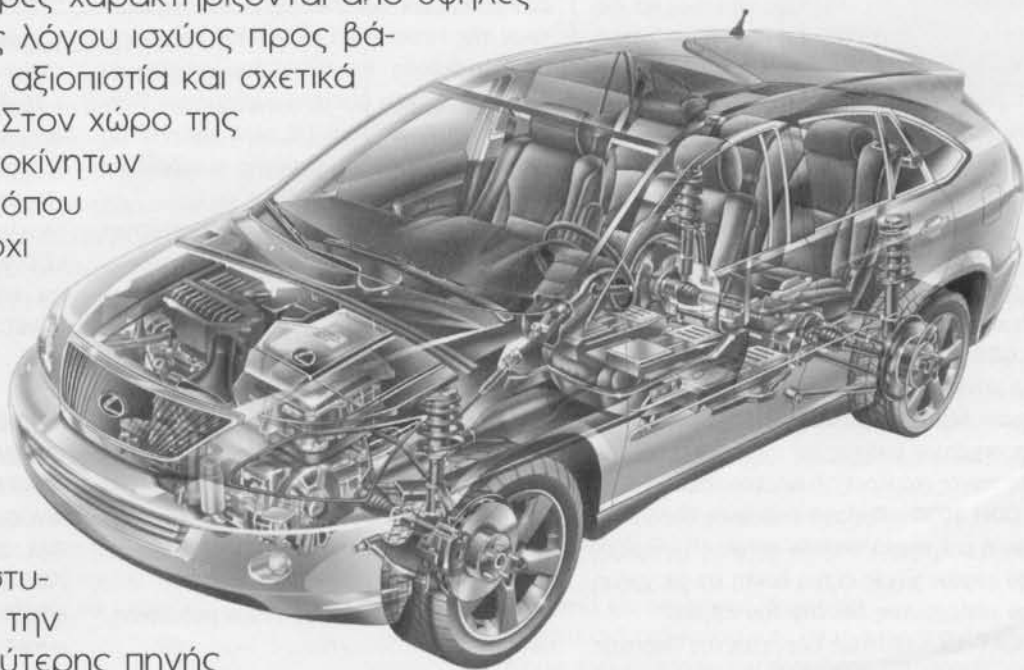


# Η σιωπηρή επανάσταση

## Η χρήση ηλεκτρονικών για την κατασκευή ενός (σχεδόν) ιδανικού κινητήρα (DC) συνεχούς ρεύματος

Από τον Ludwig Retzbach

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι εξαιρετικά απλές και αποδοτικές μηχανές. Εκεί όπου ακόμη και οι καλύτερες μηχανές diesel παρουσιάζουν έναν βαθμό απόδοσης ο οποίος μόλις φθάνει το 45%, ένας κινητήρας DC μπορεί να αποδώσει έως και 98%. Πέραν της ιδιότητας αυτής, οι DC κινητήρες χαρακτηρίζονται από υψηλές ροπές, πολύ καλές τιμές λόγου ισχύος προς βάρος, πολύ ικανοποιητική αξιοπιστία και σχετικά χαμηλές τιμές κόστους. Στον χώρο της ανάπτυξης νέων ηλεκτροκίνητων μοντέλων αεροσκαφών όπου εφαρμόζονται κάποιες όχι και τόσο συνηθισμένες αναπτυξιακές μέθοδοι, τα ιδιαιτέρως χαρακτηριστικά των DC κινητήρων οδήγησαν σε αύξηση την χρήση τους στα σύγχρονα υβριδικά μοντέλα οχημάτων. Δυστυχώς όμως η ανάγκη για την επινόηση μιας νέας καλύτερης πηγής ενέργειας για τα οχήματα αποτελεί ακόμη το ζητούμενο, έτσι ώστε το κλασικό μοντέλο των γνωστών μηχανών εσωτερικής καύσης καταλήξει για πάντα στο μουσείο.



Όταν οι συντελεστές απόδοσης μιας μηχανής αυξάνονται από μερικές επί τοις εκατό μονάδες στο μάλλον μαγικό ποσοστό του 100%, σίγουρα πολλοί θα αρχίσουν να σκέπτονται ότι μπορούμε να πιάσουμε και το "ασεϊκίνητο", εδώ όμως θα απογοητευθούν. Δεν θα πρέπει όμως να μας ξαφνιάζει το γεγονός ότι η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς την χρήση ηλεκτρικών κινητήρων για την ανάπτυξη των νέων υβριδικών τεχνολογιών. Η αλήθεια είναι ότι οι ηλεκτροκίνητες έχουν σημειώσει μια σημαντική πρόοδο πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που μπορούν μερικοί να φανταστούν, αναφέροντας απλά και μόνο ότι η πρώτη επιτυχία σημειώθηκε με την εμφάνιση των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων. Ένα σύγχρονο αυτοκίνητο, το οποίο δεν έχει σαν κύρια

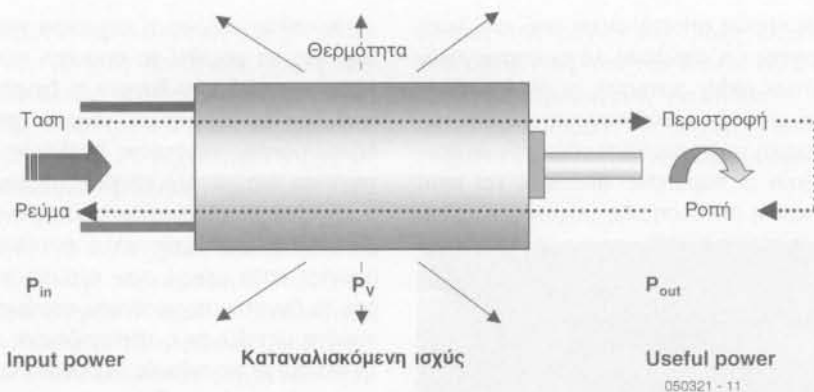
μηχανή ηλεκτρογεννήτρια εντούτοις περιλαμβάνει μια μίζα, ένα τιμόνι, σύστημα ψύξης, ηλεκτρικά παράθυρα, ηλεκτρικούς καθρέφτες, ρυθμίσεις καθισμάτων, εξαερισμό, σύστημα ελεγχόμενης ανάρτησης που όλα αυτά οδηγούνται ουσιαστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Βέβαια η παραπάνω λίστα δεν είναι καθόλου πλήρης: ένα πλήρως εξοπλισμένο σύγχρονο μοντέλο αυτοκινήτου με όλες τις επιπλέον πολυτελείς ανέσεις περιλαμβάνει στο σύστημά του πάνω από εκατό 'αόρατους' ηλεκτρικούς DC κινητήρες για όλα τα βοηθητικά συστήματα, γεγονός που οδηγεί σε ακόμη υψηλότερες απαιτήσεις για μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο συνολικό βάρος. Αν και μιλάμε για ένα σαφώς λιγότερο προηγμένο χώρο ανάπτυξης εντούτοις παρόμοια κατάσταση επικράτησε για αρκετό καιρό και

στον χώρο μοντελισμού αεροσκαφών. Η δύναμη του DC κινητήρα στα ηλεκτροκινούμενα αεροσκάφη αντιμάχεται την δύναμη της βαρύτητας κάτω από τους ανταγωνιστικούς κανόνες F5B, όπου ένα μοντέλο αεροσκάφους βάρους δύο κιλών μπορεί να εκτοξευθεί στον αέρα κατακόρυφα με 80 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η κατανάλωση ισχύος των κινητήρων αυτών, των οποίων η μάζα ανέρχεται περίπου στα 300 γραμμάρια, φθάνει κατά προσέγγιση τα τέσσερα kilowatt. Αν και πολλοί είναι εκείνοι που θεωρούν μάλλον ασήμαντες όλες αυτές τις δραστηριότητες που αντιστοιχούν ουσιαστικά σε χόμπι, εντούτοις έχουν παίξει κάποιον υποδειγματικό ρόλο σε μερικές κάπως πιο 'προσγειωμένες' εφαρμογές. Κάθε ερασιτέχνης ή παραδοσιακός κατασκευαστής θα εκτιμήσει ιδιαίτερα την αυξημένη παρα-

γωγικότητα η οποία θα οφείλεται στο ότι έχει στην διάθεσή του ένα βολικό και ελαφρύ ηλεκτρικό κατασβίδι: το πλεονέκτημα ενός ισχυρού και ελαφριού κινητήρα καθώς και την ανεπτυγμένη τεχνολογία μπαταριών.

## Περί τίνος πρόκειται

Ένας ηλεκτρικός κινητήρας είναι ένα είδος μετατροπέα στον οποίον η ηλεκτρική ισχύς ( $P_{in}$ ), που είναι το γινόμενο της τάσης ( $U$ ) και του ρεύματος ( $I$ ), μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ ( $P_{out}$ ) η οποία μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ) επί την ροπή ( $\tau$ ). Η απόδοση του κινητήρα ( $\eta$ ) υπολογίζεται από τον λόγο της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Η απώλεια ισχύος εκφράζεται με την διαφορά της ισχύος εισόδου από την ισχύ εξόδου (**Σχήμα 1**). Η διαφορά αυτή που προκύπτει δεν αντιστοιχεί ουσιαστικά σε ένα μέρος της ισχύος που 'χάνεται' αλλά που μετατρέπεται σε θερμότητα. Η καταναλισκόμενη αυτή θερμότητα αυξάνει την θερμοκρασία των εσωτερικών τμημάτων του κινητήρα, γεγονός το οποίο οδηγεί στην περαιτέρω μείωση του βαθμού απόδοσης καθώς αυξάνεται η αντίσταση του χαλκού. Τελικά η διαδικασία αυτή καταλήγει σε υπερφόρτιση και θερμική βλάβη. Με μαγνητικά υλικά ευαίσθητα σε μεταβολές της θερμοκρασίας, το παραπάνω φαινόμενο παρατηρείται μεταξύ  $120^{\circ}\text{C}$  και  $150^{\circ}\text{C}$ . Η καλή απόδοση είναι μια παράμετρος βασικής σημασίας στους ηλεκτρικούς κινητήρες, όχι μόνον από άποψη καλλίτερης χρήσης της ενέργειας αλλά και από άποψη διάρκειας ζωής. Δύο κινητήρες του ίδιου μεγέθους, ο ένας με απόδοση 80% και ο δεύτερος με απόδοση 90%, αν και διαφέρουν οι αποδόσεις τους 'μόνον' κατά 10%, εντούτοις η διαφορά στην κατανάλωση ισχύος ανέρχεται στο 50%. Η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να μετατραπεί από έναν ηλεκτρικό κινητήρα εξαρτάται κατά κανόνα από τον βαθμό απόδοσης της μηχανής. Φυσικά είναι δυνατό να τοποθετηθούν στον κινητήρα κάποια συστήματα εξαναγκασμένης ψύξης, όπως για παράδειγμα ενσωματωμένοι ανεμιστήρες, αλλά κάτι τέτοιο περιπλέκει γενικώς την κατασκευή του κινητήρα. Επιπλέον, τέτοια βοηθητικά συστήματα καταναλώνουν ποσότητα ενέργειας ακόμη και όταν δεν χρειάζεται να τεθούν σε λειτουργία, όπως σε περίπτωση οδήγησης χαμηλών φορτίων και σε αντίστοιχες υψηλές τιμές της περιστροφικής ταχύτητας. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό των μοντέρνων κινητήρων είναι η επίτευξη υψηλών στροφών (μεγαλύτερων των 50.000 ανα λεπτό). Στην



Σχήμα 1. Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί έναν πολύ αποδοτικό μετατροπέα ισχύος.

πλειοψηφία των εφαρμογών οι κινητήρες θα πρέπει να είναι σε θέση να παράγουν αρκετή ροπή σε ποιοδήποτε στροφές χωρίς την χρήση γραναζιών (απευθείας μεταβολή της κίνησης). Όπως είναι φυσικό για την επίτευξη μιας υψηλής ισχύος εξόδου απαιτείται μια υψηλή τιμή ρεύματος, που οδηγεί στην αύξηση του κόστους, ιδιαίτερα όταν η τροφοδοσία πραγματοποιείται από μπαταρίες. Για να πετύχουμε την ίδια ροπή με χαμηλότερες τιμές ρεύματος θα πρέπει να αυξηθεί ικανοποιητικά ο αριθμός των τυλιγμάτων (αγωγών) του κινητήρα. Το γεγονός αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης των τυλιγμάτων. Σε κάθε περίπτωση η κατανάλωση ισχύος στα τυλιγμάτα ενός κινητήρα θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Η καταναλισκόμενη ισχύς εξαρτάται από το ρεύμα και την αντίσταση:  $P = I^2R$ . Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας είναι η μορφή των τυλιγμάτων. Ο διαθέσιμος χώρος θα πρέπει να πληρώνεται όσο το δυνατόν περισσότερο ('υψηλός συντελεστής πλήρωσης': δείτε το **Σχήμα 2**) και όσο το δυνατόν περισσότερο μέρος του χαλκού θα πρέπει να 'συντρέχει' με την μαγνητική ροή: τα άκρα των τυλιγμάτων συνεισφέρουν στην ισχύ απωλειών αλλά όχι και στην ροπή.

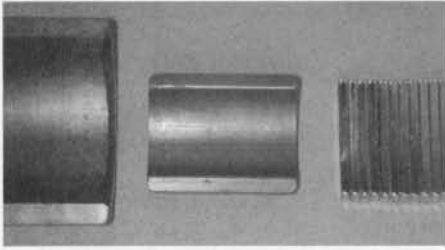
Είναι δύσκολο να επιτευχθούν ταυτόχρονα υψηλή ροπή και υψηλή απόδοση, αλλά υπάρχουν κάποιες τεχνικές με τις οποίες μπορούμε να πετύχουμε μια χρυσή τομή. Ένα παράδειγμα αποτελεί η χρήση ενός ισχυρού μαγνητικού πεδίου. Αν χρησιμοποιηθούν μόνιμοι μαγνήτες, τότε το ζήτημα που απομένει είναι ο προσδιορισμός του κόστους των υλικών. Στους μοντέρνους DC κινητήρες χρησιμοποιούνται μαγνήτες νεοδυμίου – neodymium ( $\text{NdFeB}$ ) οι οποίοι παρουσιάζουν έως και δέκα φορές μεγαλύτερη τιμή του ενεργειακού γινομένου ( $B \times H$ ) σε σύγκριση με τους κλασικούς μαγνήτες από φερριτικά υλικά ( $\text{SrFe}$ ). Έτσι αυξάνε-

ται η ροπή ενώ ελαττώνεται η ονομαστική τιμή της περιστροφικής ταχύτητας ( $n_{spec}$ ). Οι μαγνήτες νεοδυμίου μπορούν να φθάσουν σε τιμές παραμένουσας μαγνήτισης έως και 1300 millitesla ( $\text{mT}$ ). Δυστυχώς όμως είναι αρκετά ευαίσθητοι στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Για υψηλότερες θερμοκρασιακές αντοχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαγνήτες από κράμα κοβαλτίου – σμαρίου (για παράδειγμα, κράμα  $\text{SmCo5}$ ), αν και ο παραμένων μαγνητισμός αυτών των μαγνητών ανέρχεται 'μόνον' σε 1000  $\text{mT}$  (**Σχήμα 3**). Με έναν ισχυρό μαγνήτη η μάχη κερδίζεται μόνον κατά το ήμισυ. Όπως ακριβώς συμβαίνει με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, το μαγνητικό κύκλωμα θα πρέπει να διατηρείται βραχύ και με ικανοποιητικά μεγάλη ισοδύναμη διατομή (χαμηλή 'μαγνητική αντίσταση'). Ο καλλίτερος τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι η χρήση μιας μεγάλης ποσότητας σιδήρου, γεγονός το οποίο όμως δυστυχώς αυξάνει το συνολικό βάρος και είναι υπεύθυνο για την εμφάνιση επιπλέον απωλειών. Όταν ένας πυρήνας από σίδηρο (ο οποίος στους κλασικούς κινητήρες φέρει συνήθως και τα τυλιγμάτα) περιστρέφεται εντός ενός μαγνητικού πεδίου εμφανίζονται απώλειες σιδή-

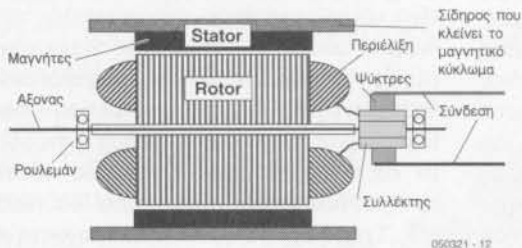


Σχήμα 2. Ένας υψηλός συντελεστής πλήρωσης είναι αρκετά σημαντικός: στην περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ υπάρχει χώρος για περαιτέρω βελτίωση!

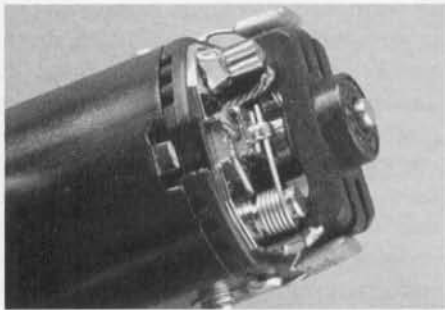
ρου οι οποίες αποτελούνται από απώλειες υστέρησης και απώλειες λόγω επαγωγικών ρευμάτων (eddy currents), οι οποίες εξαρτώνται ως επί το πλείστον και από την περιστροφική ταχύτητα. Είναι αδύνατον να αποφευχθούν οι παραπάνω απώλειες και κατά συνέπεια η απόδοση της μηχανής ελαττώ-



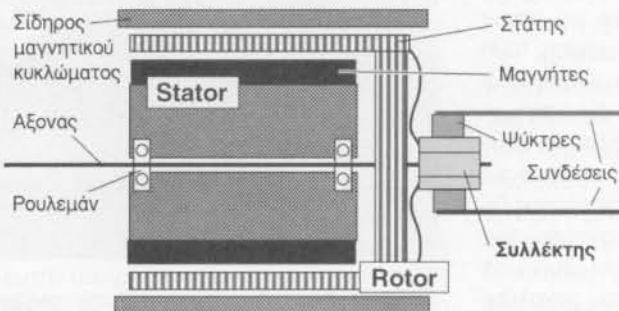
Σχήμα 3. Οι μεγάλοι μαγνήτες από φερρίτη αντικαθίστανται σταδιακά από μικρότερους μαγνήτες με βάση το στοιχείο νεοδύμιο (neodymium).



Σχήμα 4. Τομή ενός κλασικού κινητήρα με πυρήνα σιδήρου.



Σχήμα 5. Το σύστημα ψηκτρών ενός DC κινητήρα με μηχανική εναλλαγή είναι αρκετά πολύπλοκο, παρουσιάζει σημαντικές απώλειες και τριβές.



Σχήμα 6. Διάγραμμα ενός κινητήρα με μηχανική εναλλαγή και πυρήνα χωρίς σίδηρο.

νεται καθώς αυξάνει η ταχύτητα περιστροφής. Για να μειωθεί το ποσοστό των απωλειών στο ελάχιστο δυνατό οι διάφοροι κατασκευαστές κινητήρων κάνουν χρήση σιδήρου υψηλής ποιότητας ('μαλακός μαγνήτης') και ένα μεγάλο πλήθος τμημάτων. Οι πυρήνες από σίδηρο (ή σιδηροπυρήνες) δεν είναι ποτέ συμπαγείς αλλά αντίθετα διαιρούνται κατά μήκος του κορμού τους σε όσο το δυνατόν περισσότερα στρώματα, μονωμένα μεταξύ τους περιορίζοντας με τον τρόπο αυτόν τις πιθανές διαδρομές των επαγωγικών ρευμάτων. Τα επαγωγικά ρεύματα δεν εμφανίζονται μόνον στον πυρήνα αλλά και σε όλα τα υπόλοιπα αγωγικά τμήματα του κινητήρα, συμπεριλαμβανομένων του μαγνήτη και των τυλιγμάτων. Τα ρεύματα αυτά περιορίζονται εφαρμόζοντας την τεχνική τμηματοποίησης του σώματος του μαγνήτη καθώς επίσης και κατασκευάζοντας τα τυλιγμάτα από ένα πλήθος σχεδόν απόλυτα παράλληλων αγωγών ή υπό την μορφή συστάδας και σε καμία περίπτωση με την μορφή ενός απλού συμπαγούς αγωγού. Στην προσπάθεια αποφυγής της δημιουργίας απωλειών στους σιδηροπυρήνες ανακαλύφθηκαν οι κινητήρες άνευ σιδήρου (iron-free) οι οποίοι όμως δεν παρουσιάζουν υψηλές τιμές ροπών. Επομένως, ο ιδανικός κινητήρας μάλλον δεν έχει ακόμη ανακαλυφθεί: για τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής να αναζητούμε τον πιο κατάλληλο κινητήρα.

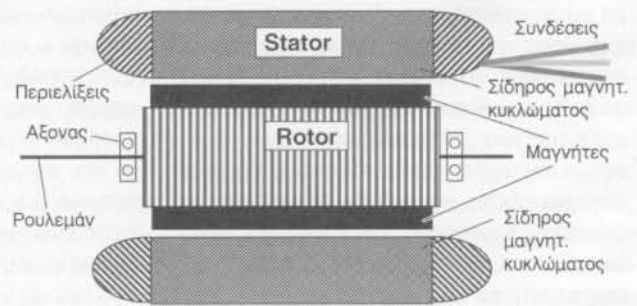
### Κλασικές κατασκευές

Από άποψη αριθμών και μόνον ο κυρίαρχος τύπος κινητήρων είναι αυτός με τον σιδηροπυρήνα (Σχήμα 4). Ο ρότορας ενός τέτοιου κινητήρα φέρει τουλάχιστον τρία επαγωγικά τμήματα (πηνιά) τα οποία επαρκούν για τις περισσότερες εφαρμογές χαμηλής τάσης. Για υψηλές ονομαστικές ταχύτητες περιστροφής απαιτείται ένας ρότορας με ομοιόμορφη εμφύτευση εποξικού

υλικού. Γύρω από τον ρότορα (δρομέα) και σε μια απόσταση μερικών χιλιοστών, που σχηματίζει ένα διάκενο (air gap) μεταξύ τους, βρίσκεται ο στάτορας (στάτης) που αποτελείται από ένα σύστημα μονίμων μαγνητών. Το κάλυμμα του κινητήρα ολοκληρώνει ('κλείνει') το μαγνητικό κύκλωμα (με ανάλογο τρόπο όπως κλείνει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με τον αγωγό επιστροφής). Οι συνδέσεις των πηνίων οδεύουν εντός των επιμέρους τμημάτων του εναλλάκτη (συλλέκτη) από όπου το ρεύμα διοχετεύεται μέσω ενός συστήματος ψηκτρών (κατασκευασμένες από χαλκό με επένδυση γραφίτη, που δικαιολογεί και την απλή ονομασία 'καρβουνάκια') στους ακροδέκτες του κινητήρα. Το τμήμα των ψηκτρών είναι εκείνο που παρουσιάζει σημαντικές τριβές και ευθύνεται για τις περισσότερες περιπτώσεις βλαβών. Το μέγεθος των ψηκτρών φανερώνει ουσιαστικά την ονομαστική ισχύ του κινητήρα. Σε κινητήρες υψηλών ρευμάτων ο εναλλάκτης (γνωστός και με την ονομασία 'συλλέκτης') έχει μεγάλο μέγεθος ενώ οι πλατιές τους ψηκτρές εξα-



σκούν σημαντική πίεση έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η πτώση τάσης. Το όλο σύστημα μοιάζει, αλλά και συμπεριφέρεται, ως ένα είδος φρένου. Σε κινητήρες του τύπου αυτού απαιτείται υψηλή τιμή ρεύματος υπό συνθήκες έλλειψης φορτίου στον άξονα (λειτουργία 'κενού') ώστε να υπερνικάται η ροπή πέδησης. Ο κινητήρας λειτουργεί οικονομικότερα σε συνθήκες μεγάλης φόρτισης, όπου η εξωτερική ροπή είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την εσωτερική. Αντίθετα, μικρότερες σε μέγεθος ψηκτρές εξασκούν χαμηλότερες δυνάμεις με αποτέλεσμα να μπορούν να χειριστούν μικρές σχετικά τιμές ρεύματος εφόσον η αντοχή του συστήματος θα πρέπει να διατηρηθεί μέσα σε κάποια λογικά όρια, γεγονός το οποίο περιορίζει σημα-



Σχήμα 7. Διάγραμμα ενός κινητήρα με εσωτερικό ρότορα χωρίς ψύκτρες.

ντικά το πεδίο των πιθανών εφαρμογών των κινητήρων αυτών. Ένα επιπλέον μειονέκτημα είναι η παραγωγή υψίσουχων παρασίτων που προέρχονται από τον εναλλάκτη και που ευθύνονται για την δημιουργία επιπλέον τριβών ενώ ταυτόχρονα απαιτείται για τον λόγο αυτόν ακριβώς να ληφθούν και τα απαραίτητα μέτρα αντιμετώπισης (Σχήμα 5). Πιο εξελιγμένοι θεωρούνται οι λεγόμενοι κινητήρες με 'πυρήνα χωρίς σίδηρο' (Σχήμα 6). Πρόκειται για ένα είδος οπλισμού που δεν περιέχει στοιχεία σιδήρου το οποίο περιστρέφεται γύρω από έναν κεντρικό μαγνήτη. Το κάλυμμα του κινητήρα κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα. Εφόσον δεν υπάρχουν στοιχεία σιδήρου που να περιστρέφονται εντός του παραγόμενου πεδίου, οι αντίστοιχες απώλειες σιδήρου είναι αμελητέες και τιμές του συντελεστή απόδοσης έως και 90% θεωρούνται εφικτές. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές ροπές αφού η μαγνητική ροή θα πρέπει να διαπεράσει δύο στρώματα διακένου καθώς και αυτό το ίδιο το πάχος του πηνίου. Οι κινητήρες με πυρήνα άνευ σιδήρου τροφοδοτούνται κατά κανόνα μέσω ενός συστήματος ψηκτρών κατασκευασμένων από ευγενή μέταλλα. Πλεονέκτημά τους θεωρείται η υψηλή τους απόδοση (αν και νοείται μόνον για χαμηλές τιμές ονομαστικής ισχύος) και ιδιαίτερα η χαμηλή ροπή αδρανείας του άξονα. Επομένως τέτοιου είδους κινητήρες θεωρούνται κατάλληλοι για εφαρμογές όπου απαιτείται δυνατότητα σχεδόν ακαριαίας απόκρισης με συνεχείς εναλλαγές ταχύτητας και κατεύθυνσης περιστροφής.

### Το πυρίτιο αντικαθιστά τον άνθρακα

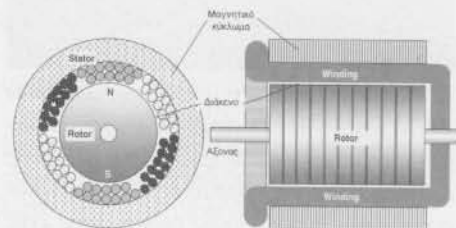
Οι τριβές και οι απώλειες που εμφανίζονται εξαιτίας της χρήσης του συλλέκτη (εναλλάκτη) σε μια κλασική κατασκευή κινητήρα δεν αποτελούν τα μοναδικά μειονεκτήματα. Εφόσον πρόκειται κατά κύριο λόγο για μια μηχανολογική κατασκευή, οι κατασκευαστές αντιμετωπίζουν σχετικά περιορισμένες επιλογές σε ότι αφορά την διαχείριση των ρευμάτων. Τα πράγματα τροποποιούνται ακόμη περισσότερο όταν πρόκειται σε ένα τέτοιο σύστημα να ενσωματώσουμε και κάποια ηλεκτρονικά κυκλώματα (δείτε το ένθετο πλαίσιο κειμένου καθώς και το άρθρο για τον ελεγκτή σύγχρονων κινητήρων που δημοσιεύεται στην τρέχουσα έκδοση). Από τα δύο μισά που σχηματίζουν το γνωστό μαγνητικό κύκλωμα, στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό τμήμα, δηλαδή το σύστημα πηνίων, δεν είναι απαραίτητα εκείνο που θα πρέπει να περιστρέφεται. Στους κινητήρες που χρησιμοποιεί-

ται ηλεκτρονικός συλλέκτης και οι οποίοι καλούνται γενικώς κινητήρες χωρίς ψήκτρους (brushless motors) (BL) ο μόνιμος μαγνήτης είναι τώρα το περιστρεφόμενο τμήμα (Σχήμα 7). Η τεχνική αυτή έχει ως αποτέλεσμα μια πιο ομαλή περιστροφή που επιτυγχάνεται με χρήση πηνίων από χάλκινο αγωγό, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνεται και η ευστάθεια της περιστροφικής ταχύτητας που τώρα εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από την ποιότητα των τριβών (ρουλεμάν), ουσιαστικά των μοναδικών μηχανικών τμημάτων που υπόκεινται στην πιθανότητα δημιουργίας τριβών και κατά συνέπεια απωλειών. Οι πρώτοι κινητήρες λειτουργούσαν με πολύ μεγάλο αριθμό ονομαστικών στροφών γεγονός που απαιτούσε την χρήση κατάλληλου μειωτήρα. Ένας κινητήρας του τύπου αυτού αποτελεί μια σχετικά απλή κατασκευή: περιλαμβάνει έναν κυλινδρικό κεντρικό μαγνήτη με τρία εμφυτευμένα πηνία γύρω του και ένα πολυστρωματικό κάλυμμα σιδήρου το οποίο ολοκληρώνει το μαγνητικό κύκλωμα (Σχήμα 8). Αφού τα άκρα των τυλιγμάτων είναι σχετικά μεγάλα σε μια τέτοια κατασκευή, οι μηχανές αυτές είναι κατά κανόνα σημαντικά μεγαλύτερες σε μήκος συγκριτικά με την διάμετρό τους. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει βελτιωμένες τιμές απόδοσης (μεγαλύτερες από 90%) καθώς επίσης και λόγου ισχύος προς βάρος.

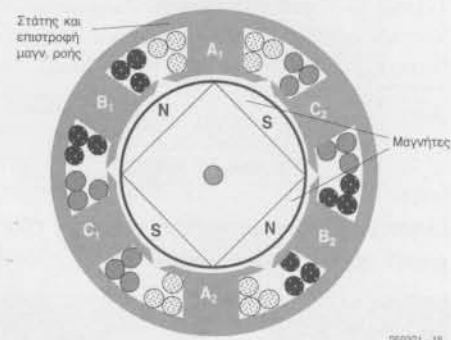
### Περισσότεροι πόλοι

Μεγαλύτερες τιμές ροπής είναι πάντοτε επιθυμητές. Σύμφωνα με μια δοκιμασμένη μέθοδο, μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό των μαγνητικών πόλων. Στα πλαίσια της κλασικής τεχνολογίας (με χρήση ψηκτρών) κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί. Ένας κινητήρας τεσσάρων πόλων (Σχήμα 9) περιλαμβάνει έναν μαγνητικό πόλο κάθε 90 μοίρες, εναλλάσσοντας τον βορά με τον νότο. Μια τέτοια κατασκευή λειτουργεί ουσιαστικά σαν να είχαμε δύο κινητήρες μέσα στο ίδιο κάλυμμα. Η περιστροφική ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί μειώνεται στο μισό, αφού μια μετάβαση από βορά σε νότο και αντίστροφα αντιστοιχεί σε μισή περιστροφή. Η ροπή όμως πολλαπλασιάζεται επί τέσσερα. Μερικές φορές αναφέρεται και ως 'ηλεκτρικός μειωτήρας 2:1'. Η παραπάνω βασική ιδέα μπορεί να επεκταθεί σε έξι, οκτώ, ή ακόμη και σε δέκα πόλους που κατανομονται γύρω από τον ρότορα με το αντίστοιχο κάθε φορά αποτέλεσμα μείωσης. Οι δια-

δρομές της μαγνητικής ροής ελαττώνονται οδεύοντας από τον βόρειο πόλο προς τον παρακείμενο, αντί για αντίθετο, νότιο πόλο. Το κάλυμμα της μηχανής που ολοκληρώνει το μαγνητικό κύκλωμα μπορεί στην



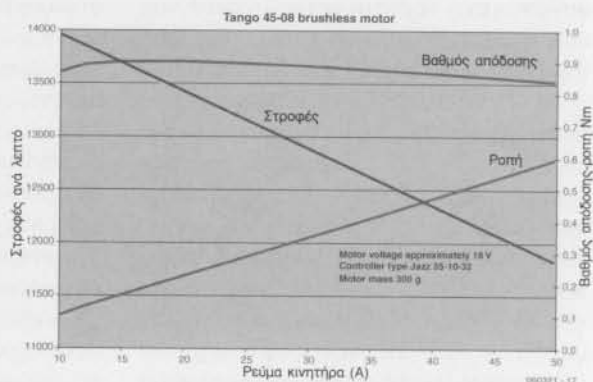
Σχήμα 8. Κατασκευή ενός κινητήρα δύο πόλων με διάκενα τυλιγμάτων.



Σχήμα 9. Διάγραμμα ενός τετραπολικού κινητήρα με τυλιγμάτα εντός εγκοπών.



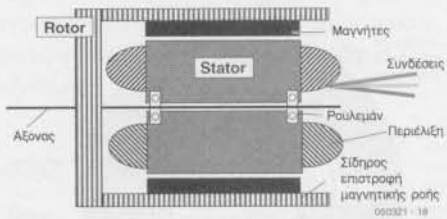
Σχήμα 10. Ψευδόμορφος άνευ σιδήρου κινητήρας τύπου 'Tango' με εξαπολικό ρότορα.



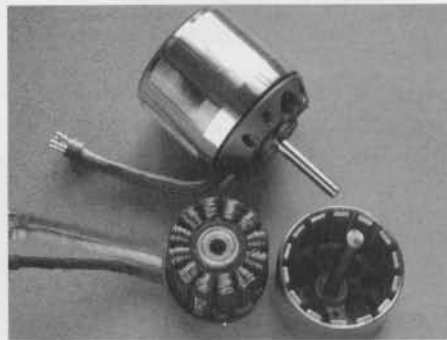
Σχήμα 11. Η ταχύτητα, η ροπή και η απόδοση του κινητήρα του Σχήματος 10 εξαρτάται από το ρεύμα του κινητήρα.



Σχήμα 12. Η απόσταση μεταξύ των μαγνητών σε μια μηχανή πολλαπλών πόλων (στη προκείμενη περίπτωση με εξωτερικό ρότορα) δεν θα πρέπει να είναι και τόσο μικρή. Στα δεξιά βλέπουμε έναν ρότορα δέκα πόλων όπου ένας πόλος σχηματίζεται από κάθε μια ομάδα τριών ρυθμιζόμενων μαγνητικών λωρίδων.



Σχήμα 13. Διάγραμμα ενός κινητήρα με εξωτερικό ρότορα χωρίς ψήκτρες.



Σχήμα 14. Ένας σύγχρονος κινητήρας με εξωτερικό ρότορα σχεδιασμένος κατάλληλα για χρήση σε μοντελισμό.

συγκεκριμένη περίπτωση να κατασκευαστεί πιο λεπτό ελαττώνοντας με τον τρόπο αυτόν το συνολικό βάρος του κινητήρα. Στην συγκεκριμένη κατασκευαστική κατεύθυνση υπάρχει μια ενδιαφέρουσα σχεδίαση που αντιστοιχεί στον κινητήρα 'Tango' από την Kontronik. Ο 6-πολικός ρότορας της μηχανής αυτής (Σχήμα 10) περιστοιχίζεται από ένα αυτοδύναμο πηνίο άνευ στοιχείων αιδήρου το οποίο παίζει τον ρόλο του στάτη. Η κατασκευή αυτή κλείνεται μέσα σε έναν αιδερόνιο κύλινδρο ο οποίος ολοκληρώνει ('κλείνει') το μαγνητικό κύκλωμα. Η νέα ιδιότητα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη κατασκευή είναι ότι ο κύλινδρος αυτός είναι μηχανικά συζευγμένος με τον ρότορα και περιστρέφεται μαζί του. Επομένως δεν υφίσταται σχετική κίνηση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου και του αιδήρου, γεγονός που ελαχιστοποιεί τις

απώλειες που εξαρτώνται από την περιστροφική ταχύτητα. Πρόκειται ουσιαστικά για μια παραλλαγή του κινητήρα χωρίς ψήκτρες με ρότορα άνευ αιδήρου ο οποίος χάρη στους έξι πόλους του μπορεί να παρουσιάσει αξιόεσθαστες τιμές ροπών (Σχήμα 11).

## Εξωτερικοί δρομείς

Όπως είναι φυσικό, ο αριθμός των πόλων που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι σαφώς περιορισμένος. Όσο μικραίνουν σε μέγεθος οι μαγνήτες, τα τυλίγματα θα πρέπει να χωρίζονται σε ολοένα και περισσότερα τμήματα. Το γεγονός αυτό δεν δημιουργεί κανένα ιδιαίτερο πρόβλημα από μόνο του, αλλά αποδεικνύεται ότι όσο οι πόλοι των μαγνητών τοποθετούνται ολοένα και πιο κοντά ο ένας στον άλλον τόσο περισσότερο ελαττώνεται ο βαθμός απόδοσης. Αυτό συμβαίνει διότι τμήμα της μαγνητικής ροής βρίσκεται διαδρομή μέσω ενός γειτονικού πόλου χωρίς να περάσει από τον στάτη. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι να μην ισχύει πλέον η σχέση μεταξύ ταχύτητας και ροπής για μεγάλες τιμές πλήθους πόλων. Απαιτείται μεγαλύτερο διάστημα μεταξύ των πόλων πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει αυτοί να διατάσσονται σε έναν μεγάλο κύκλο (Σχήμα 12). Για να μην αυξηθεί λοιπόν το μέγεθος του καλύμματος της μηχανής έχουμε σαν αποτέλεσμα μια ανατρεπτική σχεδίαση: λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες στο εξωτερικό και ηλεκτρομαγνήτες (πηνία) μεγάλου πάχους στο εσωτερικό. Το αποτέλεσμα αυτό καλείται 'εξωτερικός ρότορας' (Σχήμα 13). Το σημαντικό που προκύπτει από την συγκεκριμένη σχεδίαση είναι η ενισχυμένη απόδοση που οφείλεται στην δύναμη που παράγεται μεταξύ ρότορα και στάτη παρουσιάζοντας έτσι μεγαλύτερες τιμές ροπής. Το εξωτερικό τμήμα του κινητήρα δεν μπορεί να διατηρηθεί πλέον ακίνητο έχουμε ωστόσο το πλεονέκτημα ότι οι μαγνήτες, που περιστρέφονται μαζί με το εξωτερικό τμήμα του καλύμματος, ψύχονται καλλίτερα με αποτέλεσμα να μην υπερθερμαίνονται σε περιπτώσεις υπερφόρτισης του κινητήρα. Οι μηχανές πολλαπλών πόλων εξωτερικού ρότορα με τις αντίστοιχες εξαιρετικές τιμές ροπών, κατέχουν εξέχουσα θέση ανάμεσα στα άλλα είδη ηλεκτρικών κινητήρων και 'σκορπούν τρόπον' στους κατασκευαστές μειωτήρων. Στην περίπτωση που απαιτείται κάποιος μειωτήρας είναι βασικό να εξασφαλιστεί ότι αυτός μπορεί να αντιμετωπίσει την ροπή που μπορεί να παραχθεί από τον συγκεκριμένο κινητήρα. Μειονέκτημα των κινητήρων εξωτερικού ρότορα αποτελεί το γεγονός ότι είναι αρκετά δύσκολο να ψηχθεί

ο στάτης, ο οποίος τώρα βρίσκεται στο μέσον του κινητήρα. Θα πρέπει να αντιμετωπιστούν οι απώλειες αιδήρου και χαλκού, ενώ στην περίπτωση αυτή έχουμε μικρότερο διάστημα διαθέσιμο για τα τυλίγματα. Ο κύριος χώρος εφαρμογών για τους κινητήρες του τύπου αυτού (Σχήμα 14) αφορά επομένως την απαίτηση να μπορούμε να έχουμε σύντομες ή διακοπτόμενες εκτινάξεις ισχύος, όπως για παράδειγμα στα υβριδικά μοντέλα αυτοκινήτων και στα ηλεκτροκίνητα αεροσκάφη μοντελισμού. Μια ειδική περίπτωση στην οποία βρίσκουν εφαρμογή οι κινητήρες LRK είναι όπου ικανοποιούνται οι απαιτήσεις των μοντελιστών για απευθείας οδήγηση μιας όσο το δυνατόν μεγαλύτερης προπέλας. Η τεχνική των κινητήρων αυτών αντιστοιχεί σε μια πολύ απλή και συνεπώς οικονομική κατασκευή. Ένας αυτοδύναμος ρότορας με 14 μαγνήτες (είναι δυνατό να έχουμε και δέκα μόνο μαγνήτες) περικλείει έναν στάτη 12 τμημάτων. Εδώ χρησιμοποιείται μια ειδική τεχνική ανάπτυξης των τυλιγμάτων που χαρακτηρίζεται από την ονομασία 'τομείς χωριστών φάσεων' ('separated phase sectors'): εδώ κάθε φάση αντιστοιχεί σε έναν ξεχωριστό τομέα. Η τεχνική αυτή εγγυάται μια αρκετά στενή μαγνητική σύζευξη μεταξύ των δύο μαγνητικών συστημάτων καθώς επίσης υψηλό λόγο μείωσης ταχύτητας και υψηλές ροπές.

## Μονάδες οδήγησης του μέλλοντος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος και τα διάφορα σύγχρονα μαγνητικά υλικά έχουν επιφέρει κάποιες σημαντικές, αλλά πρακτικά अपαρατήρητες αλλαγές στην τεχνολογία των κινητήρων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι πρόκειται ουσιαστικά για μια 'σιωπηρή επανάσταση'. Σε πολλές εφαρμογές οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες παρουσιάζουν πολύ καλύτερο λόγο ισχύος προς βάρος σε σύγκριση με τις μηχανές υγρών καυσίμων. Στα αυτοκινούμενα συστήματα οδήγησης μόλις τώρα μαθαίνουμε πώς να εκμεταλλευόμαστε τις τεράστιες τιμές ροπών που μπορούν να παρουσιάσουν οι ηλεκτροκινητήρες, πρακτικά ανεξάρτητες από την περιστροφική ταχύτητα, όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει στα υβριδικά μοντέλα οχημάτων υψηλής απόδοσης σαν το Lexus RX 400h. Ο βασικός ηλεκτροκινητήρας του μεγάλου αυτού οχήματος αποδίδει ισχύ 123 kW (167 bhp) με μια ροπή ίση προς 333 Newton-metres. Ένας δεύτερος κινητήρας ο οποίος οδηγεί μόνον το σύστημα των πίσω τροχών αποδίδει ισχύ 50 kW (68 bhp) με μια ροπή ίση προς 130 Newton-metres. Οι δύο αυτοί κινητήρες σχηματίζουν ένα σύστημα συνεχούς λειτουργίας τριών φάσεων και ηλε-

κτρονικά ελεγχόμενο το οποίο λειτουργεί με μια μέγιστη τιμή τάσης 650 V. Η μπαταρία που τροφοδοτεί ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα κατασκευάζεται από 240 στοιχεία τύπου NiMH. Με μια ονομαστική τιμή του 1.2 V ανά στοιχείο, προκύπτει μια συνολική τάση ίση με 288 V, από την οποία η κεντρική μονάδα αντιστροφής παράγει τις απαιτούμενες τάσεις οδήγησης για τους κινητήρες. Η χωρητικότητα ανά στοιχείο της μπαταρίας ανέρχεται στα 6.5 Ah δίνοντας έτσι στα 288 V μια συνολική τιμή αποθηκευμένης ενέργειας ίση προς 1.87 kWh. Η μπαταρία αυτή μπορεί να δώσει έως και 45 kW.

Η τρέχουσα τάση που καταγράφεται προς την υβριδική τεχνολογία δεν παρουσιάζει μόνον το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης ισχύος και της μείωσης των ρύπων από εκπομπές CO<sub>2</sub>, αλλά ταυτόχρονα σημαίνει και ότι τα ηλεκτρικά συστήματα κίνησης μπορούν να ελεγχθούν και να υποστούν βελτιώσεις χωρίς να υπάρχει ανάγκη χρήσης επαναστατικών τεχνολογιών μπαταρίας. Αν σε κάποια δεδομένη στιγμή μπορεί να διατεθεί κάποια κατάλληλη πηγή ενέργειας (όπως είναι οι κυψέλες καυσίμου) με σκοπό να κατασκευαστεί ένα μιγώς ηλεκτρικό αυτοκινούμενο σύστημα, η αντίστοιχη τεχνο-

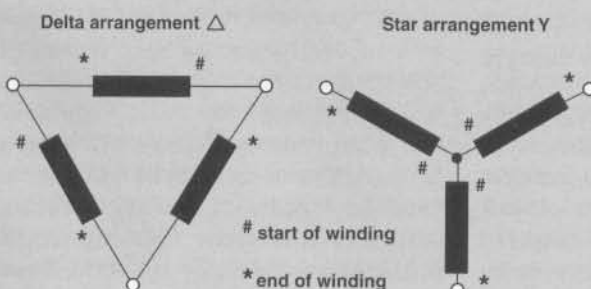
λογία των κινητήρων θα είναι ήδη σε πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο. Η βασική ιδέα που βρίσκεται πίσω από την τεχνολογία των υβριδικών αυτοκινούμενων μοντέλων θα μπορέσει να κάνει ένα ακόμη βήμα προς τα μπροστά όταν αρχίσει να γίνεται πλέον χρήση μπαταριών βασισμένων στο Λίθιο (lithium), οι οποίες είναι σημαντικά ισχυρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες κλασικές μπαταρίες που βασίζονται στο Νικέλιο (nickel). Στο σημείο αυτό και πάλι, οι κατασκευαστές απλών μοντέλων αεροσκαφών (αερομοντελιστές) είναι ήδη ένα βήμα μπροστά! (050321-1)

## Πως περιστρέφεται;

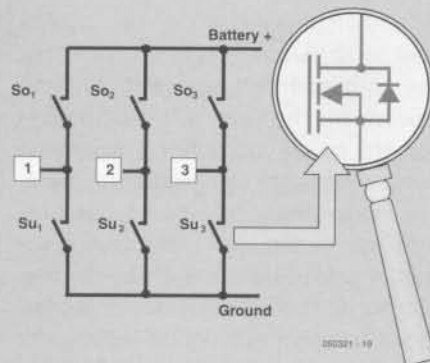
Βασικά όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο μαγνητικά συστήματα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το ένα από αυτά είναι ακίνητο και καλείται στάτης (stator). Το δεύτερο τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να κινείται περιστροφικά και καλείται δρομέας (ρότορας-rotor). Στους μοντέρνους ηλεκτρικούς DC κινητήρες ένα από τα παραπάνω συστήματα υλοποιείται με μια αμετάβλητη κατασκευή για την οποία χρησιμοποιούνται μόνιμοι μαγνήτες με σταθερή πολικότητα ενώ το δεύτερο τμήμα κατασκευάζεται από ηλεκτρομαγνήτες των οποίων η πολικότητα εξαρτάται από την φορά του ρεύματος που διέρχεται μέσα από αυτούς. Η αλληλεπίδραση των δύο συστημάτων βασίζεται στην πολύ γνωστή και κλασική αρχή σύμφωνα με την οποία "τα ετερώνυμα έλκονται και τα ομώνυμα απωθούνται". Για να επιτύχουμε συνεχή περιστροφή θα πρέπει να αντιστρέφεται η πολικότητα του ηλεκτρομαγνητικού συστήματος την στιγμή που δύο (προηγούμενα) διαφορετικοί πόλοι περνούν από το σημείο εκείνο στο οποίο η απόσταση μεταξύ τους είναι η ελάχιστη. Στην ορολογία των ηλεκτρικών μηχανών η παραπάνω αντιστροφή της πολικότητας καλείται 'εναλλαγή' (commutation). Στους κλασικούς κινητήρες η αντιστροφή πολικότητας επιτυγχάνεται με χρήση καθαρά μηχανικών μέσων, όπου τμήματα εναλλάκτη

(συλλέκτη) από χαλκό περιστρέφονται κάτω από ένα ακλόνητο σύστημα 'ψηκτρών' με το οποίο εφάπτονται αγώγιμα. Στους ηλεκτροκινητήρες (χωρίς ψήκτρους) χρησιμοποιούνται διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα με την μορφή γεφυρών που κατασκευάζονται με τρανζίστορ τύπου FET (Σχήμα 15). Για να μπορέσουμε να πετύχουμε την εκκίνηση του κινητήρα και στην συνέχεια την ομαλή του λειτουργία, απαιτούνται τουλάχιστον τρεις μισές γέφυρες. Οι τρεις έξοδοι οδηγούνται στα τυλίγματα του κινητήρα τα οποία μπορούν να συνδεθούν είτε υπό την μορφή τριγώνου είτε υπό την μορφή αστέρα. (Σχήμα 16) Τα τρία τυλίγματα του κινητήρα συνδέονται διαδοχικά στην DC τάση τροφοδοσίας και με τον τρόπο αυτόν παράγεται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο παρασέρνει μαζί του τον ρότορα. Αντιμεταθέτοντας δύο φασικές συνδέσεις αλλάζει η φορά περιστροφής του κινητήρα. Η ομοιότητα με τους τριφασικούς κινητήρες είναι αξιοσημείωτη. Κατά βάση ένας DC ηλεκτροκινητήρας με ηλεκτρονικό σύστημα εναλλάκτη ισοδυναμεί ουσιαστικά με έναν σύγχρονο κινητήρα, αν και ο ρυθμός περιστροφής του πεδίου δεν είναι σταθερός, σε ότι αφορά την συχνότητα του δικτύου καθώς επίσης ο κινητήρας δεν χρειάζεται να κάνει κάποιο βήμα με το πεδίο υπό συνθήκες μεγάλης φόρτισης. Οι τύποι των σύγχρονων DC κινητήρων που περιγράφηκαν γενικώς εδώ παράγουν την δική τους συχνότητα πεδίου με την βοήθεια των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου, το πεδίο

περιστρέφεται όπως και ο ρότορας και τα τυλίγματα μεταγόνται μόνον όταν ο ρότορας βρίσκεται στην σωστή θέση. Για να είναι δυνατό να προσδιοριστεί η θέση του ρότορα, μπορεί να γίνει χρήση αισθητήρων μαγνητικού πεδίου (όπως είναι οι αισθητήρες του φαινομένου Hall). Εντούτοις πιο πρόσφατες κατασκευές δεν περιλαμβάνουν τέτοιους αισθητήρες και ο προσδιορισμός της θέσης του ρότορα επιτυγχάνεται μέσω της ΑΗΕΔ (ΑντιΗλεκτρεγερτικής Δύναμης) που παράγεται από τον κινητήρα και που εμφανίζεται σε κάθε τύλιγμά του το οποίο προς στιγμή δεν συνδέεται με την πηγή τροφοδοσίας. Εφόσον η τάση αυτή μπορεί να μετρηθεί μόνον εφόσον ο κινητήρας περιστρέφεται, η εκκίνηση του κινητήρα θα πρέπει να γίνει υπό συνθήκες 'ανοικτού βρόχου' χωρίς την ανάδραση αυτή: κινητήρες που δεν είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλους αισθητήρες έχουν συχνά την τάση να μην εκκινούν και τόσο ομαλά. Όπως θα περιμένατε άλλωστε από το ΕΛΕΚΤΟΡ, έχουμε ουσιαστικά 'παντρέψει' την θεωρία με την πράξη: σε κάποιο άλλο άρθρο της τρέχουσας έκδοσης θα βρείτε μια κατασκευή ενός ελεγκτή για σύγχρονους DC κινητήρες.



Σχήμα 15. Απλοποιημένη μορφή κυκλώματος οδήγησης τριφασικής γέφυρας. Τα ηλεκτρονικά ελέγχου εξασφαλίζουν ότι σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να είναι σε ταυτόχρονη αγωγή δύο διακόπτες στην ίδια στήλη.



Σχήμα 16. Τα τυλίγματα ενός κινητήρα μπορούν να συνδεθούν υπό μορφή αστέρα ή τριγώνου.